自動制御教育用プログラム

松　井　稜　治*

On some programs for the education of Automatic Control Engineering

Ryoji MATSUI

1. まえがき

自動制御についても，学生の理解を深めるため，教育に実験的手段をとりいれることが重要であると思われる．そのため，準実験的手法として電算機による制御系の模擬をとりあげ，いくつかのプログラムを作製してみた．それらは次の三グループに分けられる．

1）PID 制御系の模擬及び評価

2）最適制御の計算

3）ボード線図の作図

これらのプログラムはいずれも本校電算機室 TŌSB AC 3400ライブラリに登録されているので，簡単な制御文と適当なデータを与えることにより容易に計算実行される．

ここでは，これら登録されたプログラムの使用法を紹介する．

2. PID 制御系の模擬及び評価

2・1 PID制御系のステップ応答

イ．概要

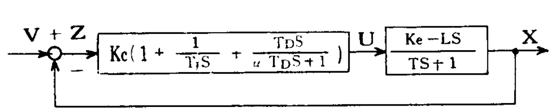


図 1　PID 制御系のブロック線図

図１の PID 制御系（制御対象：１次おくれ＋むだ時間）は適当な尺度変換（$K_cK \to K_c$，時間軸/L）を行うことにより図２のようになる．これを基準系と呼ぶことにする．

図１の制御系を微分方程式系として表すと次のようになる．

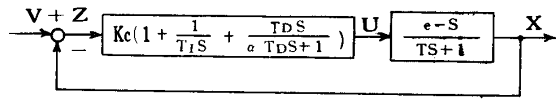


図 2　基 準 系

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{1}{T}x + \frac{K}{T}u(t-L) \tag{1}$$

$$z = v - x \tag{2}$$

$$\frac{du_1}{dt} = -\frac{1}{\alpha T_D}u_1 + \frac{K_c}{T_D}\left(\frac{\alpha T_D}{T_I} - \frac{1}{\alpha}\right) z + \frac{K_c}{T_I T_D}\int_0^t z dt \tag{3}$$

$$u = \frac{1}{\alpha}\{u_1 + K_c(1+\alpha)z\} \tag{4}$$

今，目標値 v(t) が単位ステップ入力であるとすれば（$V(s)=1/S$），$0 \leqq t < L$ では $u(t-L)=0$，$x(t)=0$ であるので

$$u(t) = K_c\left(1 + t/T_I + \frac{1}{\alpha}e^{-\frac{t}{\alpha T_D}}\right) \quad (0 \leqq t < L) \tag{5}$$

となる．また $t \geqq L$ については(1)式の $u(t-L)$ は過去の値であり既知であるから(1)式を最初に解いて，(2)，(3)，(4)の順序で数値的に解き，u(t) の値をL時間後まで記憶させておけば，この制御系のステップ応答を数値的に求めることができる．ここでは，(1)式，(3)式の微分方程式は予測子・修正子法・台形則を用いて解いた．なお，同時に制御系の積分評価関数値 ITAE, IAE, ISE も求められる（台形積分），また別のジョブでステップ応答図を作図させるため，必要な結果は補助記憶に格納される．

ロ．制御文及びデータ形式

＊　宇部工業高等専門学校機械工学科

¥JŌB　　ジョブ名　ID＝ID名，GRUP＝グループ名

¥INCLUDE　　TR-RSPNS（メイン）

¥INCLUDE　　CALPI-TR

¥EXC　　＊　　GŌ

¥FD　　5000　　DEV＝SO，BLK＝120，REC＝40，FIN＝グループ名，SPC＝3，NEW，PERM，CYL （ŌLD)

¥DATA

① KG，KIPR（2I5）

② CP，TP，TL，EPS（4E10.3）

③ CC，TI，TD，AL，AN（E10.3，A5）

④ TO，TF，NLO，NS(2E10.3，2I5）

⋮

空白カード

ハ．入力データ説明

① KG：格納を始めるファイルレコード NŌ（10レコードまで格納できる．）

KIPR：0ならステップ応答途中経過を出力，0でなければ最初と最後の値のみ出力

② CP：制御対象比例定数（図1のK，基準系ではCP＝1）．CP＝0ならば計算終了．

TP：制御対象時定数（基準系では$TP=T/L$)．

TL：制御対象むだ時間（基準系では$TL=1$）．

EPS：微分方程式の計算精度（ε）

③ CC：PID 動作の比例感度（＝図のK_c）

TI：PID 動作の積分時間

TD：PID 動作の微分時間

AL：図1，2のα

AN：5文字以内の名称

④ T0：初期時間値（通常は$T_0=0$）

TF：終端時間値（定常状態に落着く程度の値）

NLO：微分方程式計算時のキザミ巾の初期値を決めるための数．むだ時間をNLOで除した値がキザミ巾初期値となる．このキザミ巾で計算して指定精度（EPS）内におさまらなければ更に分割する．（分割数≦200）

NS：修正子繰返し制限回数

1回の計算が終了するとデータ②へ戻るので，最後尾に空白カードを入れてジョブを終了させなければならない．

ニ．出力形式

① K，T，L の値の印刷

② K_c，T_I，T_D，α の値の印刷

③ TF，ε，NS の値の印刷

④ T（時間），X（制御量），Z（偏差），u（操作量），誤差，繰返し回数を印刷（5キザミ毎）．但しKIPR≠0 ならば途中経過は印刷されない．

なお，データ，計算結果のうち CP，TP，TL，AN，T0，TF，HN，H，NI，IKF，AX，AL の順序で補助記憶に格納される（AXは寸法が1505の配列で各時刻のXの値が入る）．このデータを用いて，XYプロッタによりステップ応答図を作図することができる．その場合

READ（50′ID1）CP，TP，TL，AN，T0，TF，HN，H，NI，IKF，AX，AL

を用いて読みこむ．この時 DEFINE FILE 文が必要であることはいうまでもない．）

2・2 ステップ応答作図プログラム

前記（2・1）の補助記憶に格納されたPID制御系のステップ応答の計算結果を作図するプログラムである．

イ．制御文及び入力データ形式

¥JŌB　　ジョブ名　ID＝ID名，GRUP＝グループ名(2・1と同じ名を用いる)

¥INCLUDE　　TR-GRAPH

¥INCLUDE　　NUMB

¥INCLUDE　　AXIS

¥EXC　　＊　　GŌ

¥FD　　5000　　DEV＝S0，FIN＝グループ名，$BLK=120$，$REC=40$，*ŌLD*

¥DATA

① KG，NN，MG，DST（3I5，E10.3）

⋮

空白カード

ロ．入力データ説明

① KG：最初のファイルレコード *No*，$KG\leqq 0$ ならば終了

NN：作図個数（$KG+NN-1\leqq 10$ でなければならない）

MG：$MG\geqq 1$ ならば最初だけ軸を画き，$MG<1$ ならば毎回軸を画く．

DST：整定時間定義の許容領域幅を示す数．

$DST=0.03$なら許容領域は0.97〜1.03となる

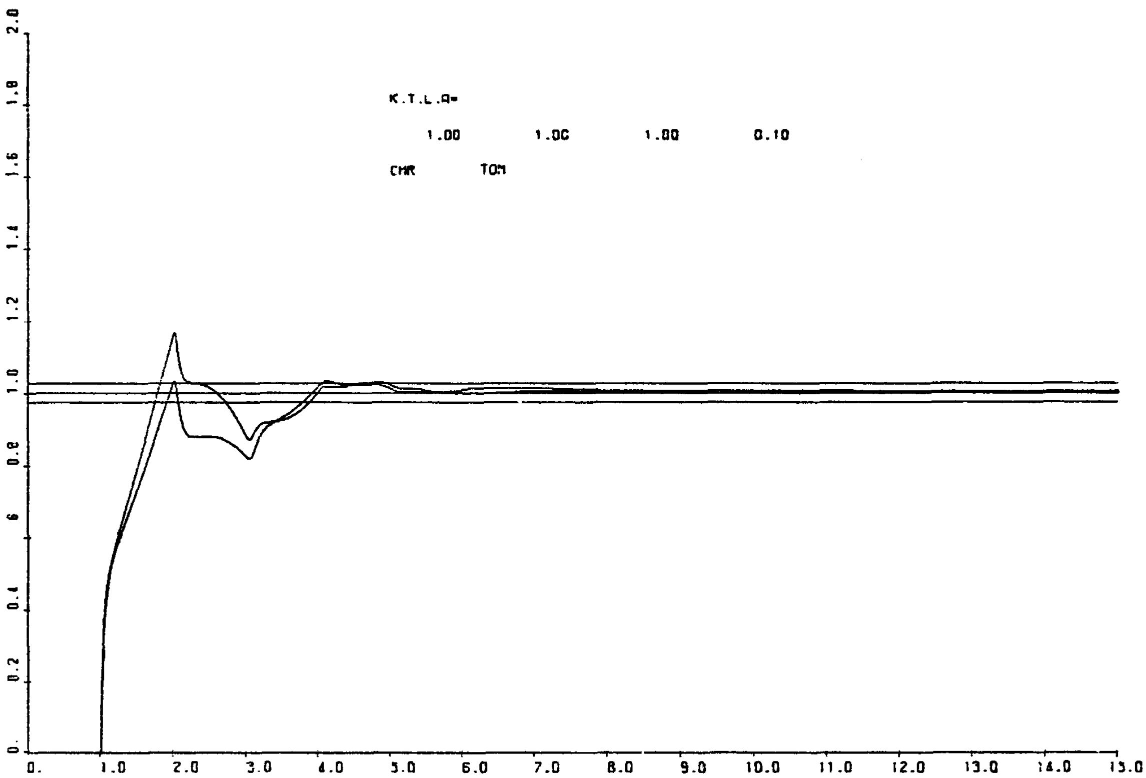


図3 PID制御系のステップ応答

（目標値は単位ステップとしているので）．

ハ．出力形式

プロッタ作図寸法は，横30cm×縦20cmで目盛数値間隔≧1，目盛間隔≧1.5cmとしてある(図3参照)．本プログラムでは作図1回毎にPAUSEが入るがこれは図の色分けなどを可能にするためである．

ラインププリンタは

①制御対象パラメーター―K，T，L，名称，初期時間，終端時間，作図キザミ間隔，AXの実際寸法

②整定時間

の順序で出力される．

2・3 ITAE，IAE，ISEの最適化プログラム（時間領域）

図2の系（基準系)で，T，αを与えて，ITAE，IAE，ISEのいずれかを最小にするPIDパラメータK_p，T_I，T_Dを求めるプログラムである．最適化法はZangwill法[1]によっている．各評価関数値は2・1の方法（台形積分，時間領域）により求める．

イ．制御文及び入力データ形式

```
¥JŌB
¥INCLUDE      PIDŌPTM（メイン）
¥INCLUDE      CPI-ŌPT
¥DATA
①T, TL, EPS, HO（4E10. 3）
②CC, TI, TD, AL（4E10. 3）
③CP, TO, TF, XEPS, NLO, NS, NX(4E10.
  3, 3I3)
  ⋮
空白カード
```

1つのデータについて計算が終ると，あらためてデータ①を読む．このときT，TL共0なら終了．従って最後に空白カードを入れてJŌB終了させる．

ロ．入力データの説明

①T：制御対象の時定数（基準化された値を用いる）

TL：制御対象のむだ時間（基準化して$L=1$．となる）

EPS：PIDパラメーター最適化の精度

HO：線形探索キザミ巾初期値

②CC，TI，TD，AL：PIDパラメータ初期値及びα

の値

③CP：制御対象ゲイン．基準化を行うのでこの値は常に1.0

TO，TF：初期時間及び終端時間

XEPS：微分方程式の解の精度

NLO，NS：　2・1参照

NX：$NX=1$ なら $ITAE$，$NX=2$ なら ISE，$NX=3$ なら IAE について最適化を行う．

ハ．出力形式

①入力データのうち T，TL，EPS，HO，AL が印刷される．

②途中経過．$P(1)=K_c$，$P(2)=K_c/T_I$，$P(3)=K_cT_D$ である．

③収束すれば SHUSŌKU と表示して K_c，T_I，T_D の値を印刷して評価関数値を表示する

2・4　ISE 値の周波数領域での計算 I（Romberg 法）[2]

図2の系で入力データとして与えられた PID パラメータについて ISE 値を周波数領域で計算するプログラムである．積分は Romberg 法を用いている．2・1のプログラムより高精度の計算が可能（10^{-6}～10^{-7}）．ISE 値は次の式で表される．

$$ISE=\frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} f(\omega)\,d\omega \tag{6}$$

ここで

$f(\omega)=F_N(\omega)/F_D(\omega)$

$F_N(\omega)=\beta^2T^2\omega^4+(\beta^2+T^2)\omega^2+1$

$F_D(\omega)=\beta^2T^2\omega^6-2\beta T(D+\beta K)\sin\omega\cdot\omega^5$

$+[T^2+\beta^2+(D+\beta K)^2+2\{\beta(D+\beta K)+T(D-\beta^2 I)\}\cos\omega]\omega^4$

$+2(D-\beta^2I-TK)\sin\omega\cdot\omega^3$

$+\{1+K^2+I(\beta^2I-2D)-2(TI-K)\cos\omega\}\omega^2$

$-2I\sin\omega\cdot\omega+I^2$

$K=K_c$，$I=K_c/T_I$，$D=K_cT_D$，$\beta=\alpha T_D$

イ．制御文及び入力データ形式

```
¥JŌB
¥INCLUDE     CALRDR   （メイン）
¥INCLUDE     RŌMFISE  （Romberg 積分）
¥INCLUDE     RŌMFNC   （被積分関数）
¥DATA
①TL，T，EPS（3E10.3）
②CC，TI，TD，AL，A1（4E10.3，A8）
  ⋮
空白カード
空白カード
```

TL，T 共0なら終了．一回のデータについて計算が終るとデータ②に戻る．このとき CC，TI共0ならデータ①へ戻る．

ロ．入力データ説明

①TL，T：制御対象のむだ時間，時定数でここでは基準化した系について計算するので $TL=1$．としておく．勿論，制御対象のゲイン定数＝1．である．

EPS：所要精度（相対誤差）

②CC，TI，TD，AL，A1：2・1参照（制御パラメータ）

ハ．出力形式

①制御対象のむだ時間，時定数，計算精度の印刷

②各制御パラメータの印刷

③ISE 値の印刷

2・5　周波数領域での ISE の最適化

ISE の計算は前記（2・4）を用いて ISE に関して PID パラメータの最適化を行う．最適化法は2・3と同じく，Zangwill 法を用いている．2・3に比較して高精度計算が可能である．PID パラメータについて大体10^{-3}の精度で計算できる．

イ．制御文及び入力データ形式

```
¥JŌB
¥INCLUDE     PIDŌPTF  （メイン）
¥INCLUDE     RŌMFISE
¥INCLUDE     RŌMFNC
¥DATA
①T，TL，EPS，HO（4E10.3）
②CP，TI，TD，AL（4E10.3）
  ⋮
空白カード
```

T，TL 共0ならば終了．データ①，②は2・3のデータ①，②と同様で，出力形式も2・3と同様である．

2・6 二重指数変換（D．E 変換）[3]による周波数領域での ISE 値

2・4と同様の計算を D・E 変換（Romberg 法併用）を用い計算するプログラムである．被積分関数を変更すれば他の関数についての積分も可能である．但し積分領

域は（0～∞）である．

なお，このプログラムでは，計算は全て倍精度で行われているので，2・4より更に高精度の計算が可能である。但し所要計算時間はやや長い．

イ．制御文及び入力データ形式

¥JŌB

¥INCLUDE　　CALRDE（メイン）

¥INCLUDE　　DEI0INF（D. E 変換を用いた0～∞の積分）

¥INCLUDE　　DEFNC（被積分関数）

¥DATA

①T，EPS（2D10. 3）

②CP，TI，TD，AL，A1（4D10. 3，A5）

⋮

空白カード

空白カード

基準化した系について計算しているので，制御対象のゲイン定数，むだ時間は共に1.である．Tは制御対象時定数（基準系），EPSは所要精度である．データ②は2.4と同様である．

$T=0$ なら終了．$TI\leqq 0$ ならデータ①へ戻る．

ロ．出力形式

①制御対象の時定数（T），計算精度（EPS）の印刷

②制御パラメータの印刷

③途中経過を印刷して，最後に SEKIBUNCHI＝として ISE 値及び最終値とその直前値との間の誤差を印刷する．

ハ．他の関数の積分

被積分関数を与える関数副プログラム（DEFNC）の代りに

DŌUBLE PRECISIŌN FUNCTIŌN FUNC (X)

を定義してやれば関数 FUNC (X) の0～∞の積分値を求めることができる．但し，引数Xも倍精度変数である．また，D. E変換による積分はプログラム DEI0 INF で行っているが，サーブルーチン文は

SUBRŌUTINE IN0INF (FUNC, EPS, S)

のようになっている．ここで，EPS，S も倍精度変数で EPS は所要精度，S は計算された積分値である．

3．最適制御の計算[4]

次のような3次系

$$\dot{\mathbf{x}}=\mathbf{A}\mathbf{x}+\mathbf{b}u \tag{7}$$

$\mathbf{x}$：3次元状態変数，u：操作量（スカラ），

$\mathbf{A}$：3×3行列，$\mathbf{b}$：3次元ベクトル

$$\mathbf{x}(0)=\mathbf{x}_0 \tag{8}$$

で，

$$|u|\leqq 1, \tag{9}$$

$$|x^i|\leqq 1 \text{（状態変数の一成分のみに制限）} \tag{10}$$

という制限条件のもとで

$$\mathbf{x}(T_f)=\mathbf{0} \tag{11}$$

T_f：終端時間（fixed）

として，しかも

$$J=\int_0^{Tf} u^2\,dt \tag{12}$$

を最小にする操作量uの時系列を求めるプログラム（サンプル値制御）である．

最適化法は勾配射影法[5]を用いている．実行可能解が存在するかどうかも調べるようプログラミングされている．また，この計算結果は補助記憶に一たん格納され，これを用いて別ジョブで状態量及び操作量の時間経過を画く作図プログラムも用意されている（3・2）．

3・1 最適制御の計算プログラム

計算に必要なデータとして，A，b，$\mathbf{x}_0$，(10)式の i，サンプリング周期 T_s，サンプリング回数 N（従って，$T_f=N\times T_s$）などを与えて上記条件を満たす u の時系列（$u(1)$，$u(2)$，………，$u(N)$）を計算する．但し，$u(N-2)$，$u(N-1)$，$u(N)$ は(8)式の条件を用いて他の $u(1)$，……，$u(N-3)$ を用いて決める．

イ．制御文及びデータ形式

```
¥JŌB          ID＝ID名，GRUP＝グループ名
¥INCLUDE      RMMAIN 1（メイン）
¥ŌVERLAY      A
¥INCLUDE      RMTRANS 1
¥INCLUDE      RMKEIS
¥INCLUDE      RMSHŌKI
¥INCLUDE      RMDIREC
¥INCLUDE      RMSUBGRP
¥INCLUDE      RMLSRCH
¥ŌVERLAY      A
¥INCLUDE      RMRWSUB
¥EXC      ＊  GŌ
¥FD      5000 DEV＝S0，BLK＝120,
              REC＝40，FIN＝グループ名,
              NEW，PERM，SPC＝1，CYL
```

（NEW 以下は登録時のみ，登録後は ŌLD に変

える）

¥DATA

①KF　(I 5)

②EPSU, EPSX, EPSS, EPSG, EPSH (5 E10. 3)

③TS, NO, NF　(E10. 3, 2I 5)

④$\mathbf{x}_0$　(3 E10. 3)

⑤ }　　(4 E10 . 3)
⑥ } **A, b**　(4 E10. 3)
⑦ }　　(4 E10, 3)

⑧*KB*, *IS*　(2I 5)

⋮

空白カード

一回の計算が終るとデータ③へ戻り *TS*＝0 ならば終了する.

ロ．入力データ説明

①KF：最初の結果を格納するファイルのレコード No (≦50)

②EPSU, EPSX：それぞれ u, x^i に関する制限領域を狭める数で,

$$|u| \leqq 1 - \mathrm{EPSU} \tag{13}$$

$$|X| \leqq 1 - \mathrm{EPSX} \tag{14}$$

として計算を行い，計算誤差による害を防ぐために使用される.

EPSS, EPSG, EPSH：収束判定用の数値で，EPSS は勾配，EPSG は関数値変化に対する収束判定数で，EPSHは探索方向を変えるかどうかの判定のための数である.

③TS：サンプリング周期

NO, NF：サンプリング回数の初期値と終値で，$T_f = (NO \sim NF) \times T_s$ について最適制御の計算を行うことになる．NO, NF は配列の寸法の大きさにより制限をうけ，最大値は23である.

④$\mathbf{x}_0$：状態変数 $\mathbf{x}$ の初期値で3次元ベクトルである.

⑤，⑥，⑦**A, b**：(7)式の **A, b** でありそれぞれ 3×3 行列，3次元ベクトルである.

⑧*KB*：*KB*＝1 ならば状態変数に制限条件(10)が付加され，*KB*＝0 ならば操作量のみにしか制限は付加されない.

IS：状態変数に制限を付ける場合，第 IS 成分に制限条件を付加するという意味をもつ．従って状態変数には一成分のみに対して制限を付加することができる.

ハ．出力形式

①各 EPS の値を印刷

②サンプリング周期 T_s，サンプリング回数 NO, NF を印刷

③状態量初期値 $\mathbf{x}_0$ の値の印刷

④状態遷移行列の値の印刷

⑤制限条件式係数（AM, CM, CSM, CSV, CSMX, CSVX）

⑥実行可能解が存在すれば FEASIBLE SŌLU と印刷して，初期実行可能解を印刷（操作量，制限付状態量の順）

⑦IA, JF：解が制約条件に対して境界上にあれば 1，内部にあれば 0 と表示

⑧S0：原勾配

⑨SCN, SN：実行可能方向ベクトル（射影勾配）のノルムと正規化された方向

⑩PFF：評価関数値$\left(\int_0^{Tf} u^2 dt = T_s \sum_i^N u_i^2\right)$

⑪収束すれば CŌNV と表示して終了．収束条件は，勾配のノルムの大きさ，評価関数値の変化，解の動き方などにより決めている.

3・2　最適制御作図プログラム

3・1で計算された結果はファイルに格納される．このデータを用いて最適制御の状態量，操作量の時間経過を XY プロッタで作図するプログラムである.

イ．制御文及び入力データ形式

```
¥JŌB           ID=ID名,  GRUP=グループ名
¥INCLUDE       ŌPTC-GR
¥INCLUDE       NUMB
¥INCLUDE       AXIS
¥EXC       ＊  GŌ
¥FD        5000  DEV=S0, BLK=120,
                 REC=40, FIN=グループ名, ŌLD
¥DATA
```

①KF, KS (2I 5)

②SCX, XST, SCY, YST, MX, MY (4 E10. 3, 2I 5)

ロ．入力データ説明

①KF：最初のファイルレコード NŌ

KS：グラフ個数

②SCX, SCY：X座標，Y座標の作図倍率

XST, YST：X軸，Y軸目盛数値間隔

MX：X軸目盛間隔数

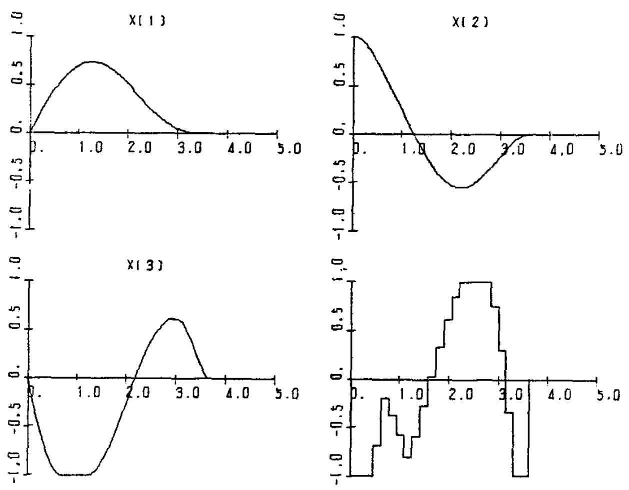
MY：Y軸正側目盛間隔数

ハ．出力形式

①XYプロッタ：状態量3個と操作量の時間経過の作図，サンプリング周期，状態方程式係数などの値を出力する．

②ラインプリンタ：

各サンプリング時操作量，状態方程式係数，状態遷移行列各要素，各状態変数（1サンプリング周期を更に4等分割している）を印刷



TS＝0．1570　KK＝23　　A〔I,J〕，B〔I〕＝

0.	1.000	0.	0.
0.	0.	1.000	0.
−1.000	1.600	−1.640	1.000

図4　最適制御の例

例．図4（プロッタ出力）は

$TS=0.157$

$N=23$

$$\mathbf{A}=\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1.6 & -1.64 \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{b}=\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

の例である．

4．ボード線図

開ループ伝達関数が

$$G(s)=G_1(s)\cdot G_2(s)\cdots\cdots\cdots\cdots G_n(s) \qquad (15)$$

のようにn個の要素の積で表されるとき，各要素の形をデータとして与えて，各要素のボード線図や合成ボード線図をXYプロッタを使用して画く．また，(13)を制御対象として比例制御（フィードバック制御）したときの位相交点，限界感度及びそのときの振動の周期などを計算してラインプリンタで印刷する．

要素形としては，1次，2次，むだ時間要素と3次以上要素に分けている．

イ．制御文及び入力データ形式

```
¥JŌB
¥INCLUDE        RM-BŌDE
¥INCLUDE        NUMB
¥DATA
```

①KN, WO, GK, IPN, IFL, 1GP, ANM
　　（I5，2E10．3，3I5，A5）

②INI, TI, ZI, IPI　（I5，2E10．3，I5）

：要素データで要素個数分

また　$3\leqq INI<100$　ならば

③$A(I)$　（5E10．3）

ロ．入力データ説明

①KN：要素個数

WO：最小角周波数

GK：系のゲイン定数（$GK=0$なら終了）

IPN：合成計算を行うときIPN＞0，このとき系の位相交点，限界感度及びそのときの振動周期を計算する．

IFL：軸，目盛線を画かないとき $IFL\geqq 1$

IGP：合成図を画かないとき $IGP\geqq 1$

ANM：名称（5文字以内）

②各要素のデータを入力

INI：要素の形を指定

$INI=0$ なら　$G_i(s)=e^{-Ls}$

$INI=-1$ なら $G_i(s)=1/(T_is+1)$

$INI=1$　なら $G_i(s)=T_iS+1$

$INI=-2$ なら $G_i(s)=1/(T_i^2S^2+2\zeta T_iS+1)$

$INI=2$ なら $G_i(s)=T_i^2S^2+2\zeta T_iS+1$

$INI>100$ なら $G_i(s)=S^{(INI-100)}$

$INI<-100$ なら $G_i(s)=1/S^{(/INI/-100)}$

TI：$|INI|=1$ or 2 のとき T_i の値

$INl=0$　のとき L の値

ZI：$|INI|=2$ のとき ζ の値

IPI：この値が0のとき要素図を画き，1のとき要素図を画かない．

③A(I)：$3\leqq|INI|<100$ のとき，要素は

$$G_i(s)=a_1s^{INI}+a_2s^{INI-1}+\cdots\cdots+a^{INI+1} \qquad (INI>0)$$

$$G_i(s)=1/(a_1s^{-INI}+a_2s^{-INI1-}+\cdots\cdots+a^{-INI+1}) \qquad (INI<0)$$

の形をしている．$A(I)$は上式の係数 a_i を意味している．

ハ．出力形式

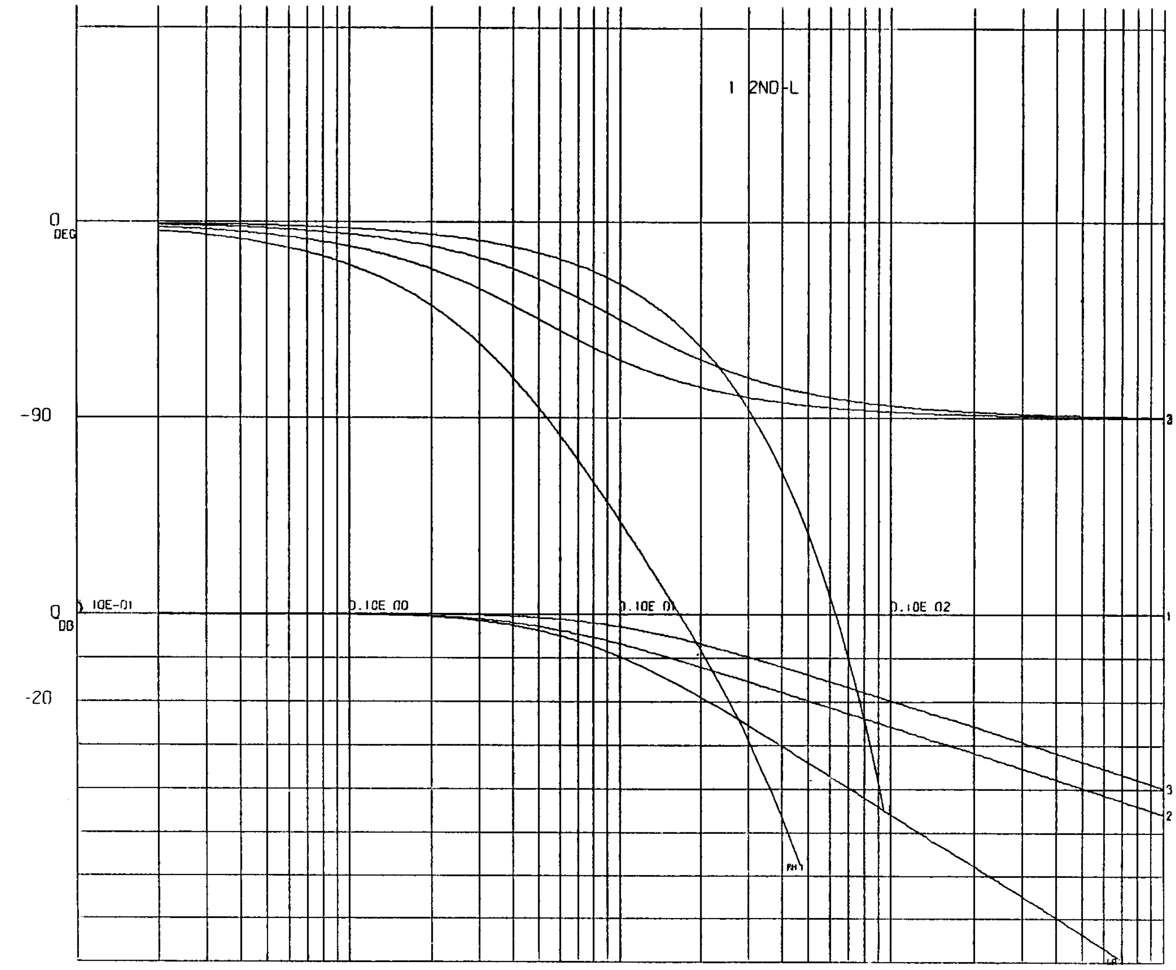


図５ ボード線図の例

①XY プロッタ：周波数幅４dec（横25cm，A４片対数方眼紙と同サイズ），位相 $-270°\sim90°$，ゲイン -80dB～100dB の範囲のボード線図を画く．

②ラインプリンタ：

要素数，系のゲイン定数，名称，

要素各定数，

位相交点，限界感度，そのときの振動の周期．

を印刷する．

図５は $G(s)=\dfrac{e^{-LS}}{(T_1S+1)(T_2S+1)}$,

$T_1=2.$, $T_2=1.$, $L=0.5$ に対するボード線図である．これに対して入力データは次のようになる．

①	3	0.02	1.0	1	0	0	2ND-L
②	0	0.5					
	－1	2.0					
	－1	1.0					
	空白カード						

5. おわりに

ここに紹介したプログラムは自動制御のごく一部の分野のものである．今後の課題として，更に広い分野にわたるプログカムを作製し，充実しなければならないであろう．なお計算及び作図には，本校電算機室 TŌSBAC 3400を使用した．

プログラム作製及び計算実行にあたっては卒業研究の諸君並に本校電算機室　山岡技官に多大なる御協力をいただきましたことに謝意を表します．

参考文献

1）Zangwill, W. I.：Minimizing a function without calculating derivatives, Compt. J., Vol. 10, 1967

2）松井：PID 制御系の ISE 値，宇部高専研究報告，第24号，昭53

3）森　正武：曲面と曲線，教育出版

4）松井：準最適制御の一計算法，宇部高専研究報告，第25号，昭54

5）Rosen, J. B.：TheGradient Projection Method for Nonlinear Programming, J. SIAM, Mathematics, Vol. 8, No. 1, 1960

（昭和54年９月８日受理）